doi:10.13866/j.azr.2019.01.18

胡杨叶黄期对气候变化的时空响应与区域差异①

陈 娟, 刘普幸
(西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要: 利用中国绿洲的41个胡杨分布区地面气象站点近57 a的逐日平均气温资料,运用线性趋势、ArcGIS的反距离加权(IDW)插值法、Morlet小波功率谱、Mann-Kendall检验和相关分析法等方法,分析中国绿洲胡杨叶黄期的时空特征、区域增暖响应与差异。结果表明:近57 a来,中国绿洲胡杨叶黄起止日均明显推迟、叶黄期呈延长的变化趋势,变化倾向率分别为0.72 d·(10a)$^{-1}$、1.39 d·(10a)$^{-1}$($\alpha \geq 0.05$)和0.66 d·(10a)$^{-1}$;胡杨叶黄起止日均呈自西南向东北逐渐提前的变化规律,其中,柴达木绿洲推迟趋势最明显,新疆南部绿洲不明显。除新疆北部外,叶黄期呈自南向北逐渐缩短的变化规律,空间差异十分明显;且分别存在2.2 a、3.0 a和5.2~5.6 a的短周期,与大气环流2~4 a和厄尔尼诺2~7 a的周期相吻合;胡杨叶黄起止日及叶黄期分别在2003年、1990年、1961年发生了突变,各绿洲区突变不尽相同;研究区胡杨叶黄起止日与叶黄期分别与前期(6—8月和7—9月)月平均气温、所在月(9—11月)平均气温呈显著相关,相关系数分别为0.703、0.697和0.715($\alpha \geq 0.001$)。反映了中国绿洲胡杨叶黄期对全球气候变暖的响应既敏感又有区域差异。

关键词: 胡杨;叶黄期;时空响应;区域差异;绿洲;中国

IPCC第5次评估报告中指出:近30 a来,全球地表平均气温升高了0.85 ℃[1],植被是生态系统中最活跃的因子[2],植物物候则是气候变化的敏感指示器,对陆地生态系统的变化具有重要的指示作用[3]。植物物候又与气候变化密切相关[4],因此,研究植被对气候变化的响应是当今科学界的重要任务之一[5]。诸多研究表明,气候变化使植物物候和生长季各期都发生了显著变化。随着近年来气温的升高,植被春季物候提前、秋季物候推迟和生长季的延长已成为了一种全球趋势[6]。Cleland等[7]认为,近百年来气候变暖已造成全球草本植物生长期延长,预期未来气候变化将导致生长季节进一步延长[8]。在高纬度地区,春季物候期提前,秋季物候期推迟及绿叶期的延长趋势都要比中低纬度地区大[9],过去的几十年中,由于全球变暖,北半球中高纬度植物的生长季提前或延长[10],其中,北半球70%的地区其生长季终止日的推迟趋势都很明显[11]。我国自20世纪60年代在竺可桢领导下开始物候方面的研究工作以来[12],已对北京植被[13]、浙江省植被[14]、山东西南木本植物[15]、大兴安岭兴安落叶松[16]、黄土高原半干旱区植物[17]、秦岭植物[18]的物候变化特征进行了研究,均得出了春季物候期提前、秋季物候期推迟及生长季延长的相关结论。

胡杨(*Populus euphratica*),属杨柳科杨属植物,是中亚荒漠地区分布最广的乔木之一[19],中国绿洲的胡杨林主要分布在河套平原和阿拉善高原、河西走廊与青海柴达木盆地及新疆绿洲[20],具有耐盐碱、抗风沙、抗大气干旱的独特特性[19],并具有重要的生态功能[21]。其生长季起止日和生长期的变化,是研究中国绿洲气候变化的指示器[22]。其中胡杨叶黄期尤为引人关注,它不仅是干旱区一种典型的地理景观,而且极具旅游价值,各绿洲已陆续开始将它打造成为当地一种旅游资源。研究中国绿洲胡杨叶黄期对气候变暖的响应,既有重要的理论意义,也有提升旅游价值的现实意义。目前,有关胡杨的研究主要集中在河西绿洲的胡杨生长季起止日和年生长期[22-23]及新疆南部(南疆)绿洲的胡杨展叶始日和叶黄初日[24]等。本文基于气象数据,利用多种方法,通过对中国绿洲胡杨叶黄起止日及叶黄期时空变化特征对全球气候变化的响应及区域差异的探

① **收稿日期:** 2018-05-15; **修订日期:** 2018-07-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(41561080)资助
作者简介: 陈娟(1991-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为干旱区域环境与绿洲建设. E-mail:cj152035427@163.com
通讯作者: 刘普幸. E-mail:lxbsdnwnu@163.com

讨,以期更好地揭示胡杨叶黄期的变化特征、机制与响应,旨在为该区域的生态环境建设提供理论依据,也有助于提升研究区应对全球气候变化的能力。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

中国绿洲主要位于西北温带干旱地区,地处34°25′~48°10′N、73°40′~109°08′E之间,以内陆流域型绿洲为主且几乎都依托于高大山系而存在(图1)。该区以暖温带大陆性荒漠气候为主,冬季干冷,夏季炎热,气温的年月变化较大;年热量丰富但极不稳定,热量从东向西增加,但柴达木盆地因受青藏高原垂直带的影响,大多时间的积温不足1 500 ℃[25];中国绿洲的空气干燥,蒸发量较大,年均降水在200 mm以下;光照充足,太阳总辐射大于5.04 × 10^5 MJ · m^{-2};土壤主要由风沙土、荒漠灰漠土和棕漠土组成;主要的地带性植被有荒漠植被和荒漠草原。

1.2 资料与方法

1.2.1 *数据来源及处理* 为尽可能确保所选气象站点数据长度的一致性,气象数据的时间跨度为1960年1月1日至2016年12月31日,对缺测、迁移及没有胡杨分布的站点进行剔除。最后,选取中国绿洲胡杨分布区的41个地面气象站1960—2016年的逐日平均气温资料,资料源自中国气象数据网(http://www.cma.gov.cn/)。

1.2.2 *研究方法* 由于我国已建成的物候观测站点观测的植物种类少、时间短,很难进行长序列的物候变化研究,而温度是影响植物物候变化的主要气候因子[23],因此,许多学者利用界限温度来研究植物的物候期。本文根据魏庆莒[19]提出的秋季日平均气温约为18.5 ℃时,胡杨叶色由绿色转变为淡黄色,进入叶黄始日,直至日平均气温5 ℃为胡杨叶落终期的方法来确定胡杨叶黄起止日及叶黄期。采用5 d滑动平均法,当一年中任何连续5 d的日平均气温持续≤18.5 ℃时,选第一个连续5 d日平均气温≤18.5 ℃的首日作为胡杨叶黄起始日;当任意连续5 d的日平均气温值持续≥5 ℃时,选择平均每日气温≥5 ℃的第一个连续5 d的首日作为胡杨叶黄终止日。中国绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期则是按照绿洲亚区各站点数据加权平均获得。利用线性趋势法分析中国绿洲及各绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期的时间变化特征;运用ArcGIS 10.2中的反距离(IDW)加权插值法,分析其空间的变化特征;利用Morlet小波功率谱分析方法和Mann-Kendall方法进行周期分析和突变检验,分析它们对增暖的响应;运用相关分析法揭示叶黄期时空变化的可能原因。

2 结果与分析

2.1 胡杨叶黄期的时间变化特征

近57 a来,中国绿洲胡杨叶黄起、止日及叶黄期呈明显推迟和延长趋势(图2),变化倾向率分别

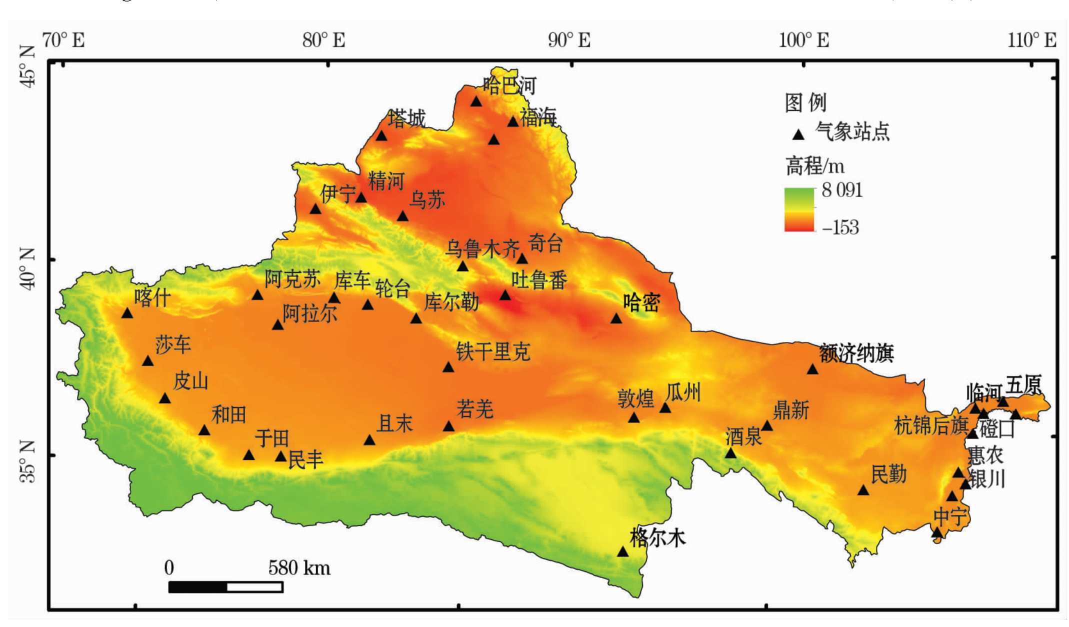


图1 中国绿洲胡杨分布区气象站点的分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the oases growing *P. euphratica* in China

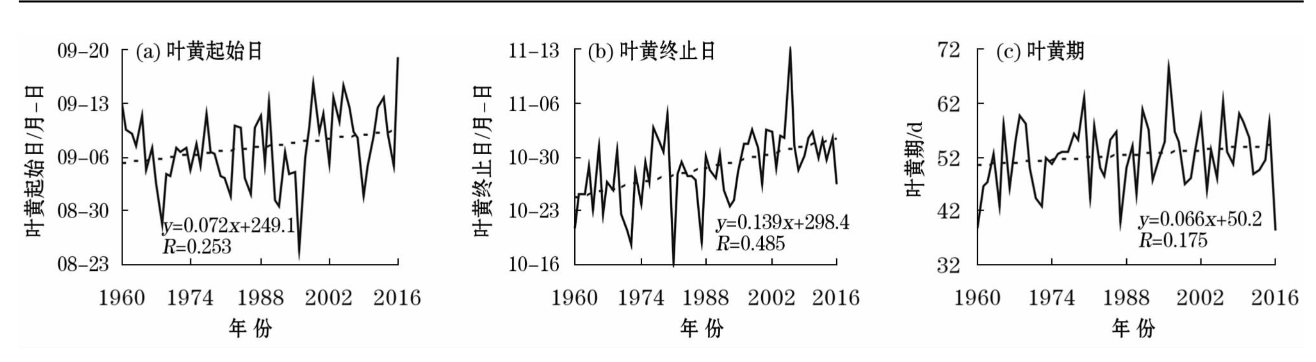


图 2　中国绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期的年际变化

Fig. 2　Changes of the beginning and ending dates and period of leaf yellow of *P. euphratica* in the oases in China

为 0.72 d·(10a)$^{-1}$、1.39 d·(10a)$^{-1}$($\alpha\geqslant0.05$)和 0.66 d·(10a)$^{-1}$。在过去的 57 a 里,中国绿洲叶黄起始日平均延迟了 4.1 d,其中最早的是 1996 年 8 月 25 日,最晚的是 2016 年的 9 月 19 日,叶黄起始日的平均日期为 9 月 7 日。叶黄终止日的平均日期在 57 a 里推迟了 7.9 d,最早的是 1981 年 10 月 16 日,最晚的是 2006 年的 11 月 13 日,平均终止日是 10 月 28 日。57 a 来胡杨叶黄期平均延长了 3.8 d,平均叶黄期是 52 d,其中,1996 年的最长是 69 d,最短为 2016 年的 39 d。从表 1 可以看出,叶黄起始日在 1980s—1990s 略有提前趋势,提前了 0.52 d,到 1990s 开始有推迟趋势,且 1990s—2000s 推迟趋势最明显,推迟了 4.37 d;2000s 叶黄终止日推迟趋势明显,其中在 2000s 至 2016 年提前了 1.14 d,且 1990s—2000s 终止日推迟趋势最明显,推迟了 3.33 d;1990s 叶黄期延长趋势明显,1990s 至 2016 年,叶黄期呈逐渐缩短趋势,其中,1980s—1990s 叶黄期延长趋势最明显,延长了 2.41 d。

综上所述,近 57 a 来中国绿洲胡杨叶黄起、止日均存在明显的推迟趋势,这与中国木本植物秋季的叶黄由于气候增暖而日期推迟的结论相一致[15],叶黄期存在略延长的趋势,这是因为叶黄终止日推迟趋势略高于起始日推迟趋势所致。

表 1　中国绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期年代际距平

Tab. 1　Decadal anomalies of the beginning and ending dates and period of leaf yellow of *P. euphratica* in the oases in China

年代	叶黄起始日/d	叶黄终止日/d	叶黄期/d
1960s	-0.72	-2.40	-1.68
1970s	-0.60	-1.79	-1.2
1980s	-1.40	-1.56	-0.16
1990s	-1.92	0.33	2.25
2000s	2.45	3.66	1.21
2010—2016 年	3.11	2.52	-0.59

2.2　胡杨叶黄期变化的区域差异

由图 3 可知,近 57 a 来,中国各绿洲胡杨叶黄起始日均呈推迟趋势,但推迟程度不一,其中,柴达木绿洲叶黄起始日平均是 8 月 2 日,开始最早,推迟趋势也最明显,变化倾向率是 2.54 d·(10a)$^{-1}$($\alpha\geqslant0.05$),57 a平均推迟了 14.5 d;南疆绿洲的最晚,平均是 9 月 13 日,推迟趋势也是最不明显的,变化倾向率仅 0.41 d·(10a)$^{-1}$,57 a 平均推迟了 2.3 d。中国各绿洲胡杨叶黄终止日均呈推迟趋势,其中,柴达木绿洲叶黄期结束最早,平均为 10 月 14 日,推迟趋势最明显,变化倾向率为 1.89 d·(10a)$^{-1}$($\alpha\geqslant0.05$),57 a 平均推迟了 10.8 d;南疆绿洲的叶黄期结束最晚,平均为 11 月 2 日,河西绿洲的推迟趋势是最不明显的,变化倾向率为 0.59 d·(10a)$^{-1}$,终止日平均推迟了 3.4 d。中国各绿洲胡杨叶黄期长短不一,南疆、北疆和阿拉善绿洲呈延长趋势,河套、河西和柴达木绿洲叶黄期均呈缩短趋势。其中,柴达木绿洲平均叶黄期最长,为 74 d,阿拉善绿洲最短,为 45 d。南疆绿洲叶黄期的延长趋势最明显,变化倾向率为 0.92 d·(10a)$^{-1}$,57 a 延长 5.2 d;柴达木绿洲叶黄期缩短趋势最明显,变化倾向率为 -0.65 d·(10a)$^{-1}$,57 a 叶黄期缩短 3.7 d。

2.3　胡杨叶黄期的空间变化特征

利用 ArcGIS 10.2 中的 IDW 插值,以中国绿洲的 41 个站点胡杨叶黄起止日和叶黄期 57 a 的平均值为参数进行插值,同时辅以其变化倾向率,绘制出中国绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期的空间分布图(图 4),更好地反映其空间动态变化特征。

从图 4 可以看出,中国绿洲胡杨叶黄起止日的空间分布均呈现自西南向东北逐渐提前的变化规

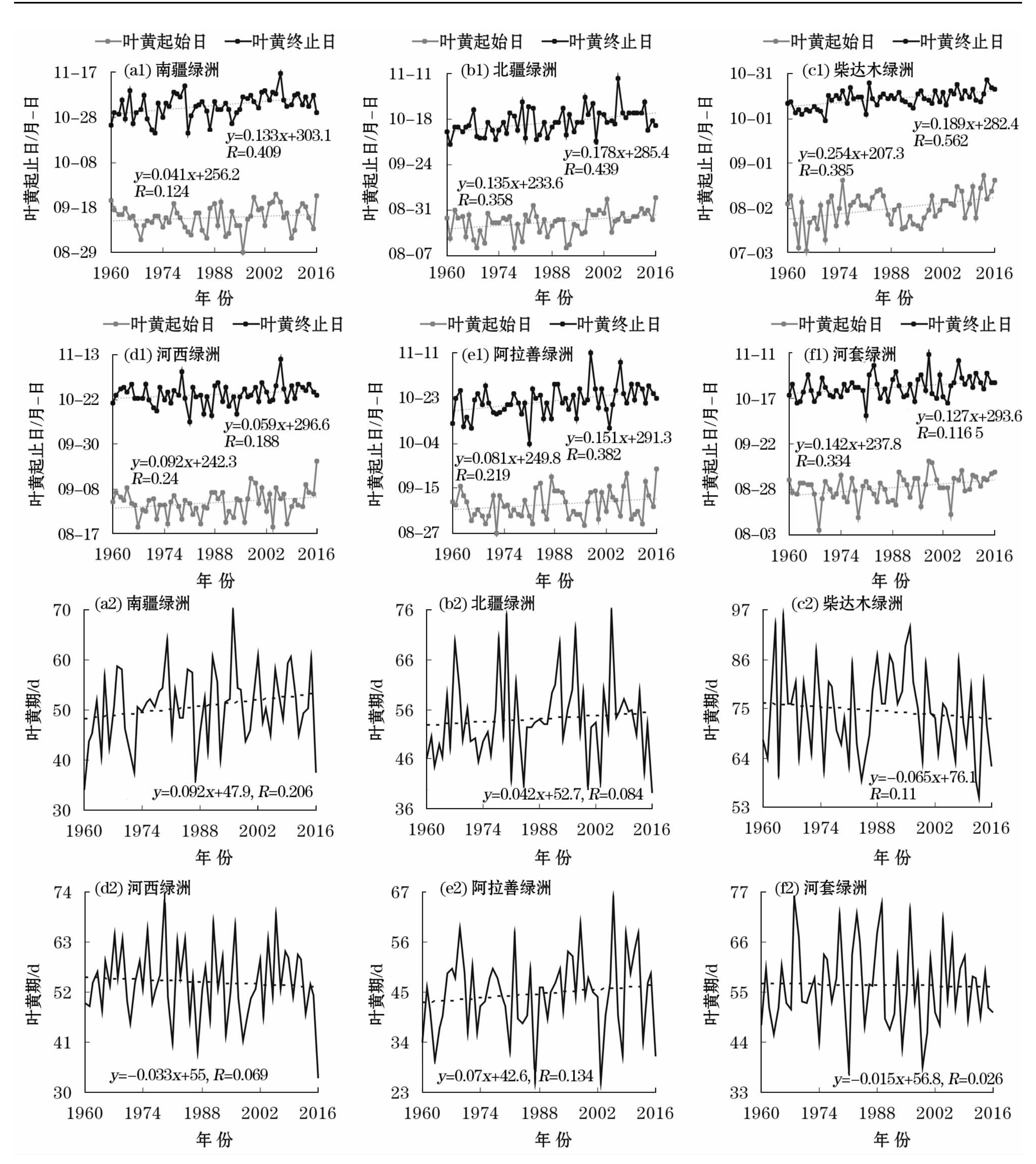


图 3　各绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期年际变化

Fig. 3　Changes of the beginning and ending dates and period of leaf yellow of *P. euphratica* in the oases

律，且新疆绿洲的这种变化规律最为明显，叶黄期则是除北疆北部外，自南向北逐渐缩短的变化规律较为明显。中国绿洲胡杨的叶黄起始日介于 7 月 23 日至 9 月 29 日之间，终止日是 10 月 3 日至 11 月 12 日，叶黄期 40 ~ 75 d，其中，柴达木绿洲叶黄起始日最早，这是因为柴达木绿洲地处青藏高原东北部，是唯一高原绿洲，对温度的响应最敏感，与青藏高原一体成为中国气候的放大区、敏感区；南疆绿洲西南部胡杨叶黄起止日最晚，是因为南疆地处塔里木盆地，属暖温带气候，受天山与昆仑山阻隔，热量难以扩散，整体较暖；北疆北部绿洲终止日最早，这可能与新疆北部近 48 a 来年平均气温有所升高，但夏季气温增幅不明显有关[26]。

从各站点的变化趋势来看，中国绿洲胡杨叶黄

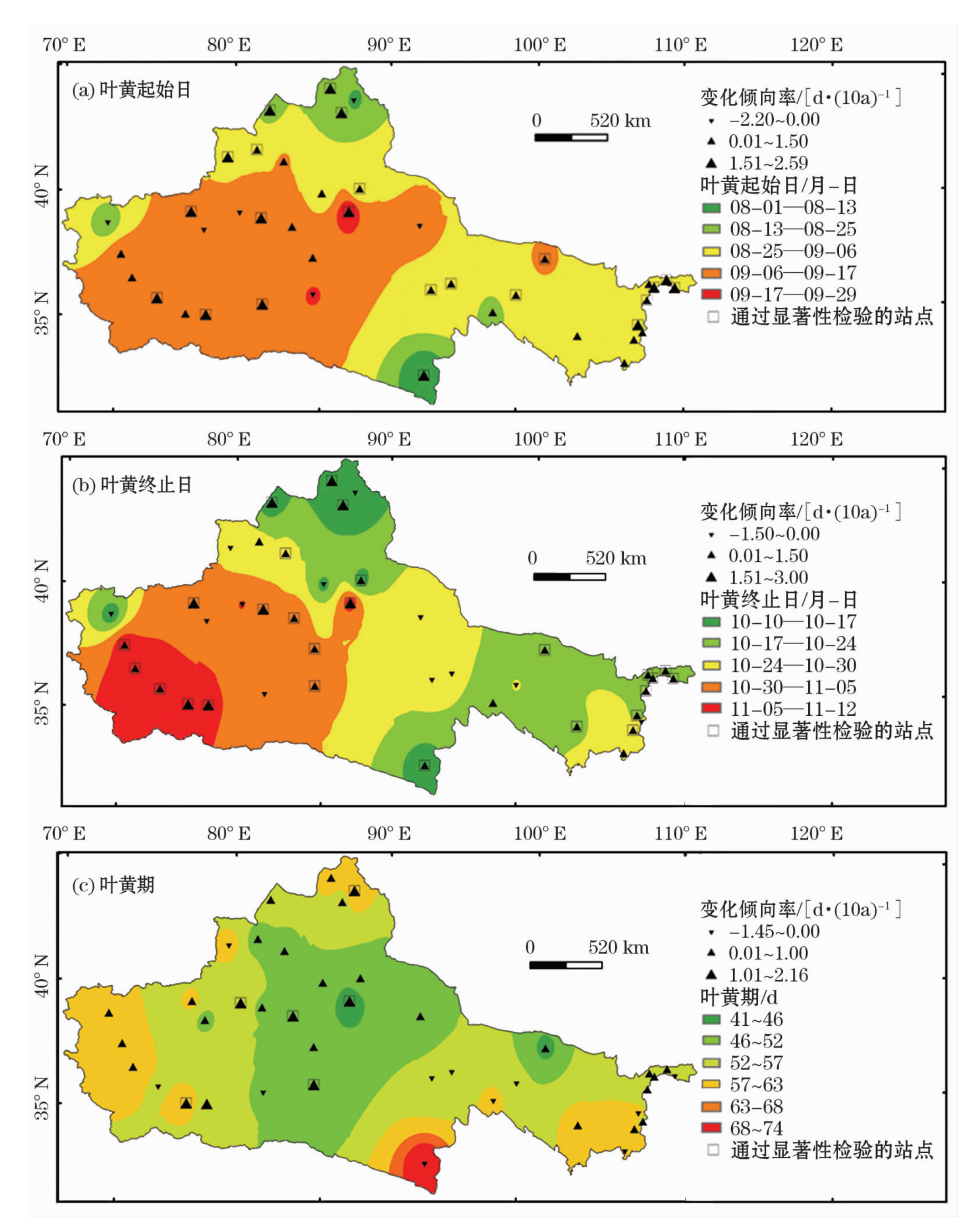


图4　中国绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期空间变化特征

Fig. 4　Spatial variation of the beginning and ending dates and period of leaf yellow of *P. euphratica* in the oases in China

起始日85.4%的站点呈推迟趋势,其中68.6%的站点通过0.1的显著性检验;叶黄期终止日则是92.7%的站点呈推迟趋势,其中68.4%的站点通过0.1的显著性检验;叶黄期68.3%的站点呈延长趋势,其中21.4%的站点通过0.1的显著性检验。这表明,中国绿洲胡杨叶黄起止日推迟的趋势非常明显,其中,柴达木绿洲胡杨叶黄起止日推迟的趋势最明显,这可能与其是高原绿洲,位居青藏高原的独特地理位置有关,也与近30 a柴达木盆地气温整体升高,秋冬增幅最为明显的区域气候响应相吻合[27];南疆绿洲塔里木盆地叶黄起止日推迟趋势很不明显,这可能与近50 a来南疆大部秋季均温上升幅度较小,为0.6~1.5 ℃,其中塔里木盆地上升幅度不足1.0 ℃的区域气候变化与响应有关[28]。

2.4　胡杨叶黄期对增温的区域差异分析

2.4.1　周期分析　本文运用Morlet小波功率谱分析方法分析了中国绿洲胡杨叶黄起止日及叶黄期的周期(图5)。近57 a来,中国绿洲胡杨叶黄起始日存在2.2 a和5.6 a ($\alpha \geq 0.05$)的周期,1980s初期

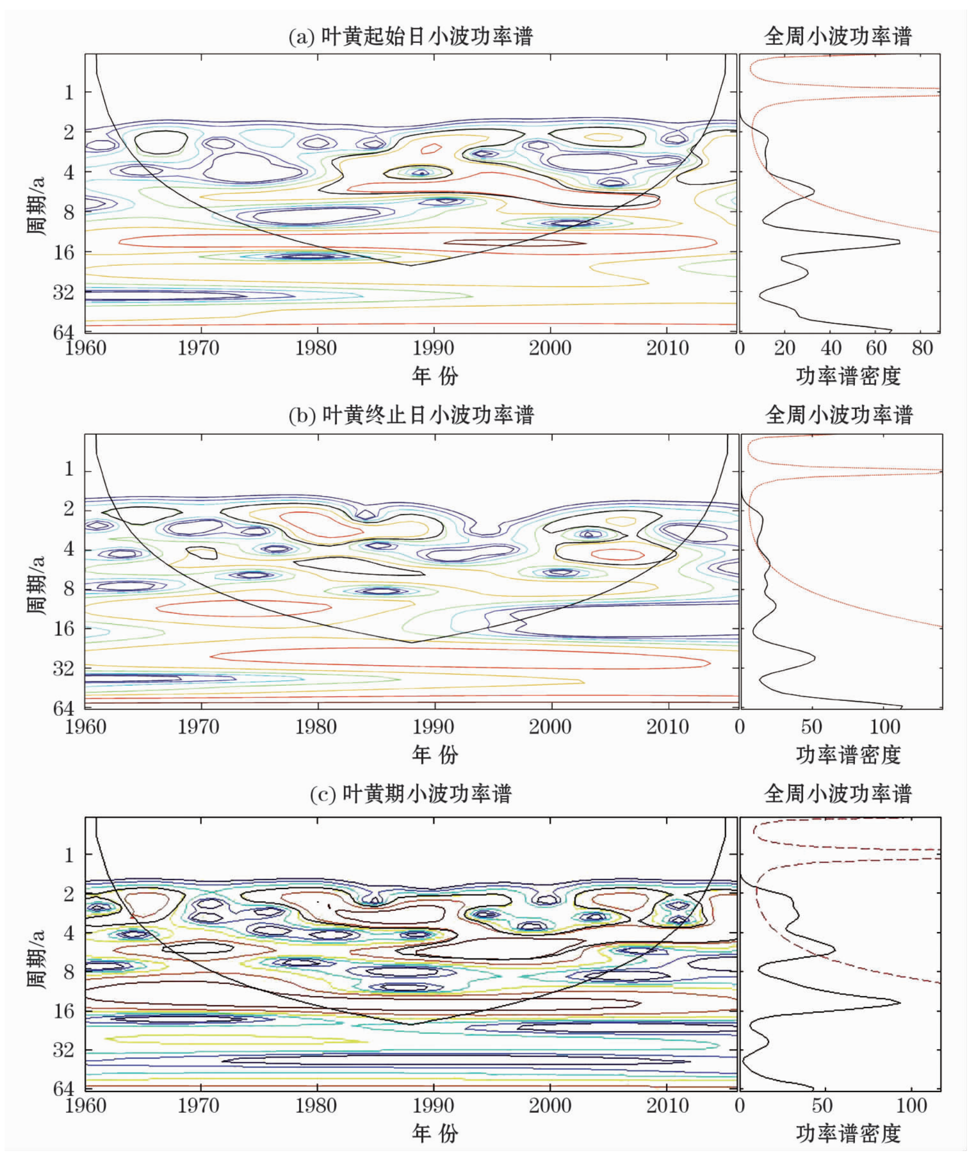


图 5　中国绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期的小波分析

Fig. 5　Wavelet analysis of the beginning and ending dates and period of leaf yellow of *P. euphratica* in the oases in China

到 2010 年间为能量密度峰值主要集中区,该区存在 2 ~ 8 a 的震荡周期并通过红噪声检验;中国绿洲胡杨叶黄终止日存在 2.2 a 和 5.2 a (α≥0.05)的周期,1970s 中期至 1990s 和 2000s 至 2010 年间为能量密度峰值的主要集中区,该区存在 2 ~ 8 a 的震荡周期并通过了红噪声检验;中国绿洲叶黄期存在 2.2 a、3 a 和 5.6 a (α≥0.05)的周期,1960s 至 1970s 和 1970s 中期到 2016 年间为能量密度峰值的主要集中区,该区存在 2 ~ 8 a 的震荡周期并通过了红噪声检验。胡杨叶黄起止日和叶黄期的周期均与厄尔尼诺的 2 ~ 7 a 活动周期吻合,其中,叶黄起止日 2.2 a 的周期及叶黄期 2.2 a、3 a 的周期则与大气环流 2 ~ 4 a 周期吻合,表明其受厄尔尼诺和大气环流的影响可能较大。

2.4.2　突变分析　本文利用 Mann-Kendall 法对 1960—2016 年中国绿洲(图 6)及子区域(表 2)胡杨叶黄起止日和叶黄期的变化进行突变分析,子序列长度为 3 a,给定显著性水平 α = 0.01,临界线 U_α = ±2.56。

结果表明,近 57 a 来,中国绿洲叶黄起始日分别在 2003 年、2007 年和 2011 年发生突变,且在 2003 年和 2007 年突变后叶黄起始日提前,2011 年发生突变后叶黄起始日推迟;叶黄终止日突变点为 1990 年,突变后终止日提前;胡杨叶黄期 1961 年发生突变,突变后叶黄期延长的趋势较明显。从各区域来看,胡杨叶黄起始日突变最早的区域为柴达木绿洲,突变年份在 1973 年,其余各绿洲叶黄起始日突变年均发生在1980s以后,其中,河西绿洲发生突

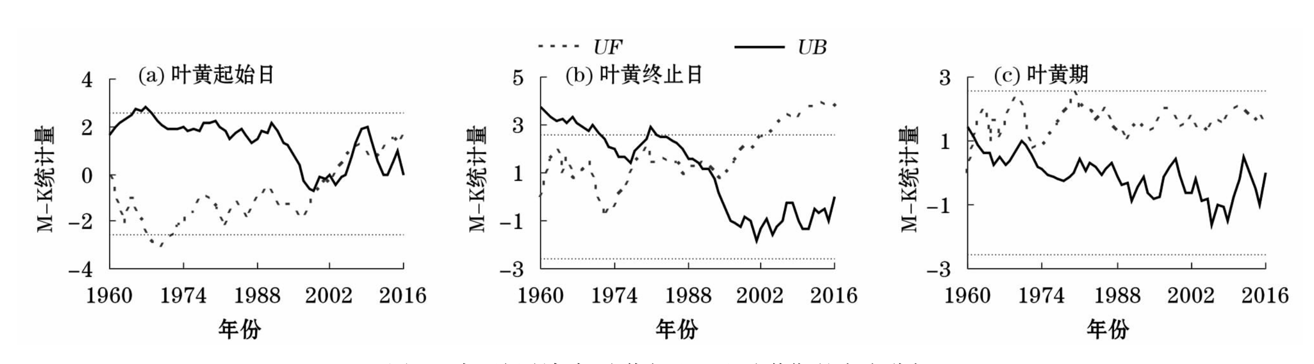


图 6　中国绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期的突变分析

Fig. 6　Mutation analysis of the beginning and ending dates and period of leaf yellow of *P. euphratica* in the oases in China

表 2　中国各绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期的突变分析

Tab. 2　Mutation analysis of the beginning and ending dates and period of leaf yellow of *P. euphratica* in the oases in China

	胡杨叶黄起始日突变年份	胡杨叶黄终止日突变年份	胡杨叶黄期突变年份
南疆绿洲	2003,2007,2011,2015	1993	1961
北疆绿洲	2010	1980,1983,1988	1965
柴达木绿洲	1979,1980,2005	1973	2012,2013,2016
河西绿洲	2013	1961,1965,2004	1961,1985,1992,2000,2016
阿拉善绿洲	1983,1987,1997,2009,2012	1982,1985	1961,1962,1965
河套绿洲	2007,2008,2010,2012,2013	1982,1984,1988,1990,2003	1963,1964

变最晚,为 2013 年;河西绿洲胡杨叶黄终止日突变最早为 1961 年,南疆绿洲最晚在 1993 年;胡杨叶黄期突变最早的区域为南疆绿洲、河西绿洲和阿拉善绿洲,突变点均在 1961 年,柴达木绿洲叶黄期突变最晚在 2012 年。

2.5　胡杨叶黄期对区域增温的响应

本文对研究区胡杨叶黄起、止日和叶黄期天数与前 3 个月平均气温、所在月平均气温及所在月最高气温进行了相关分析(图 7),探讨胡杨叶黄期变化与气温之间的响应机制。近 57 a 来,中国绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期天数与前 3 个月平均气温、所在月平均气温和最高气温均呈显著的正相关关系。其中,中国绿洲叶黄起始日与前 3 个月(6—8 月)平均气温的相关系数最高,为 0.703($\alpha \geq 0.001$),与月平均气温和最高气温的相关系数分别为 0.588 和 0.631($\alpha \geq 0.001$);叶黄终止日也与前 3 个月(7—9 月)平均气温相关系数最高,是 0.697($\alpha \geq 0.001$),与月最高气温及月平均气温的相关系数分别为 0.685 和 0.649($\alpha \geq 0.001$);叶黄期与所在月平均气温相关系数最高,为 0.715($\alpha \geq 0.001$),与月最高气温及前 3 个月平均气温的相关系数分别为 0.709 和 0.703($\alpha \geq 0.001$)。表明胡杨叶黄起、止日受前 3 个月平均气温的影响更明显,叶黄期则与 9—11 月平均气温相关性更高,9—11 月的平均气温越高,叶黄期天数越长。

3　结 论

(1) 近 57 a 来,中国绿洲胡杨叶黄起止日存在推迟的变化趋势,叶黄期呈延长的趋势,变化倾向率为 0.72 d·$(10a)^{-1}$、1.39 d·$(10a)^{-1}$($\alpha \geq 0.05$)和 0.66 d·$(10a)^{-1}$。其中,柴达木盆地绿洲平均叶黄起止日最早,变化最显著,南疆绿洲最晚;柴达木绿洲平均叶黄期最长,阿拉善绿洲最短。

(2) 空间分布上,中国绿洲胡杨叶黄起止日均呈现自西南向东北逐渐提前的变化规律,且新疆绿洲的变化规律最明显,叶黄期除北疆北部外,呈自南向北逐渐缩短的变化规律。其中,胡杨叶黄起止日推迟趋势最明显的是柴达木绿洲,南疆绿洲不明显。

(3) 周期分析表明,中国绿洲胡杨叶黄起止日及叶黄期分别存在 2.2~5.6 a 的周期特征,与厄尔尼诺的 2~7 a 活动周期相吻合,叶黄起止日 2.2 a 的周期及叶黄期 2.2 a、3 a 的周期与大气环流 2~4 a 周期吻合,表明其受厄尔尼诺和大气环流的影响较大。胡杨叶黄起止日及叶黄期分别在 2003 年、1990 年、1961 年发生突变。其中,柴达木绿洲叶黄

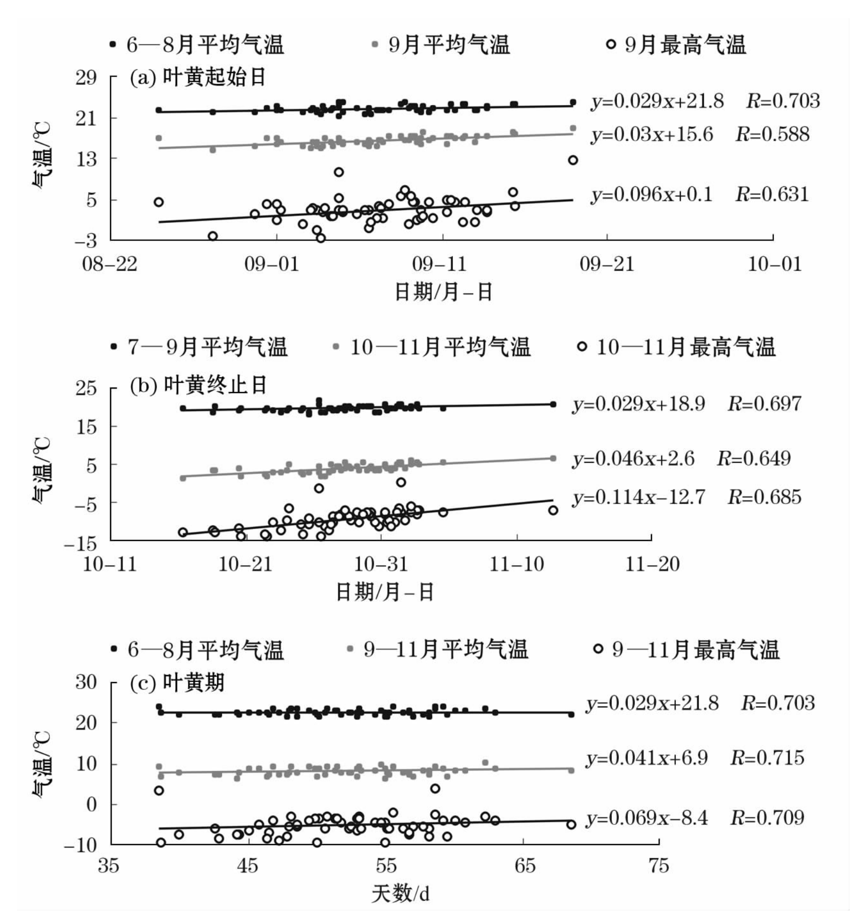


图 7 中国绿洲胡杨叶黄起止日和叶黄期与月均温及月最高气温的相关分析

Fig. 7 Correlation analysis between the beginning and ending dates and period of leaf yellow of *P. euphratica* and the average monthly temperature and maximum monthly temperature in the oases in China

起始日突变最早，河西绿洲最晚；河西绿洲叶黄终止日突变最早，南疆绿洲最晚；河西绿洲的叶黄期突变最早，柴达木绿洲是最晚的。

(4) 研究区胡杨叶黄起止日及叶黄期与前 3 个月平均气温、所在月平均气温及所在月最高气温均呈显著的正相关，其中，胡杨叶黄起、止日与前 3 个月的平均气温相关系数最高，分别为 0.703 和 0.697 ($\alpha \geq 0.001$)；叶黄期与所在月平均气温的相关系数最高，为 0.715 ($\alpha \geq 0.001$)，表明所在月平均气温越高，叶黄期天数越长。

参考文献(References)：

〔1〕 秦大河，Thomas Stocker，259 名作者和 TSU（驻伯尔尼和北京）. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论〔J〕. 气候变化研究进展，2014，10(1)：1－6.〔Qin Dahe，Thomas Stocker，259 Authors and TSU (Bern & Beijing). Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report〔J〕. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis，2014，10(1)：1－6.〕

〔2〕 施奈勒 F. 植物物候学〔M〕. 北京：科学出版社，1965：46－50.〔Schnelle F. Plant Phenology〔M〕. Beijing：Science Press，1965：46－50.〕

〔3〕 Walther G R，Post E，Convey P，et al. Ecological responses to recent climate change〔J〕. Nature，2002，416(6 879)：389.

〔4〕 Kathuroju N，White M A，Symanzik J，et al. On the use of the advanced very high resolution radiometer for development of prognostic land surface phenology models〔J〕. Ecological Modelling，2007，201(2)：144－156.

〔5〕 高志强，刘纪远. 1980—2000 年中国 LUCC 对气候变化的响应〔J〕. 地理学报，2006，61(8)：865－872.〔Gao Zhiqiang，Liu Jiyuan. The LUCC responses to climate changes in China from 1980 to 2000〔J〕. Acta Geographica Sinica，2006，61(8)：865－872.〕

〔6〕 徐雨晴，陆佩玲，于强. 气候变化对植物物候影响的研究进展〔J〕. 资源科学，2004，26(1)：129－136.〔Xu Yuqing，Lu Peiling，Yu Qiang. Review and prospect in the researches of influence of climate change on plant phenology〔J〕. Resources Science，2004，26(1)：129－136.〕

〔7〕 Cleland E E，Chiariello N R，Loarie S R，et al. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem〔J〕. Proceedings of the National Academy of Sciences，2006，103(37)：13 740－13 744.

〔8〕 Vliet A J H V, Bron W A, Mulder S, et al. Observed climate-induced changes in plant phenology in the Netherlands〔J〕. Regional Environmental Change, 2014, 14(3):997 – 1 008.

〔9〕 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响〔J〕. 地理学报, 1995, 50(5):402 – 410.〔Zhang Fuchun. Effects of global warming on plant phonological everts in China〔J〕. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(5):402 – 410.〕

〔10〕 Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999〔J〕. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106:20 069 – 20 083.

〔11〕 Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe〔J〕. Nature, 1999, 397(6 721):659.

〔12〕 葛全胜, 戴君虎, 郑景云. 物候学研究进展及中国现代物候学面临的挑战〔J〕. 中国科学院院刊, 2010, 25(3):310 – 316.〔Ge Quansheng, Dai Junhu, Zheng Jingyun. The progress of phenology studies and challenges to modern phenology research in China〔J〕. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2010, 25(3):310 – 316.〕

〔13〕 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 近 50 年北京植被对全球变暖的响应及其时效〔J〕. 生态学杂志, 2005, 24(2):123 – 130.〔Zhang Xuexia, Ge Quansheng, Zheng Jingyun. Impacts and lags of global warming on vegetation in Beijing for the last 50 years based on remotely sensed data and phonological information〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(2):123 – 130.〕

〔14〕 何月, 樊高峰, 张小伟, 等. 浙江省植被物候变化及其对气候变化的响应〔J〕. 自然资源学报, 2013, 28(2):220 – 233.〔He Yue, Fan Gaofeng, Zhang Xiaowei, et al. Vegetation phenological variation and its response to climate changes in Zhejiang province〔J〕. Journal of Natural Resources, 2013, 28(2):220 – 233.〕

〔15〕 Li R Y, Sun D B, Jiang X D. Response of typical woody plants phenology to climate warming in Southwestern Shandong Province〔J〕. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2):135 – 140.

〔16〕 杨丽萍, 秦艳, 张存厚, 等. 气候变化对大兴安岭兴安落叶松物候期的影响〔J〕. 干旱区研究, 2016, 33(3):577 – 583.〔Yang Liping, Qin Yan, Zhang Cunhou, et al. Influence of climate change on the phenophase of *Larix gmelinii* in the Greater Khingan Mountains〔J〕. Arid Zone Research, 2016, 33(3):577 – 583.〕

〔17〕 雷俊, 姚玉璧, 孙润, 等. 黄土高原半干旱区物候变化特征及其对气候变暖的响应〔J〕. 中国农业气象, 2017, 38(1):1 – 8.〔Lei Jun, Yao Yubi, Sun Run, et al. Phenological variation and its response to climate warming in Semi-Arid Region of Loess Plateau〔J〕. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(1):1 – 8.〕

〔18〕 Deng C H, Bai H Y, Zhai D P, et al. Variation in plant phenology in the Qinling Mountains from 1964 – 2015 in the context of climate change〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23):7 882 – 7 893.

〔19〕 魏庆莒. 胡杨〔M〕. 北京:中国林业出版社, 1990:7 – 21.〔Wei Qingju. *Populus euphratica*〔M〕. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990:7 – 21.〕

〔20〕 王世绩, 陈炳浩, 李护群. 胡杨林〔M〕. 北京:中国环境科学出版社, 1995:16 – 18.〔Wang Shiji, Chen Binghao, Li Huqun. *Populus euphratica*〔M〕. Beijing: China Environmental Science Press, 1995:16 – 18.〕

〔21〕 刘树宝, 陈亚宁, 陈亚鹏, 等. 黑河下游荒漠河岸林不同林龄胡杨对脉冲式降雨的响应〔J〕. 干旱区研究, 2016, 33(1):172 – 178.〔Liu Shubao, Chen Yaning, Chen Yapeng, et al. Response of *Populus euphratica* at different ages to rainfall pulses in the desert riparian forest of the lower reaches of the Heihe Riwer〔J〕. Arid Zone Research, 2016, 33(1):172 – 178.〕

〔22〕 Zhang W X, Liu P X, Feng Q R, et al. The spatiotemporal responses of *Populus euphratica* to global warming in Chinese oases between 1960 and 2015〔J〕. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(5):579 – 594.

〔23〕 刘普幸, 杨泉. 敦煌绿洲 1955 年至 2010 年胡杨年生长季对气候变化的响应〔J〕. 资源科学, 2012, 34(3):566 – 571.〔Liu Puxing, Yang Quan. Response of the annual growing season of *Populus euphratica* to climate change in Dunhuang Oasis from 1955 to 2010〔J〕. Resources Science, 2012, 34(3):566 – 571.〕

〔24〕 买尔燕古丽·阿不都热合曼, 艾里西尔·库尔班, 阿迪力·阿不来提, 等. 塔里木河下游胡杨物候特征观测〔J〕. 干旱区研究, 2008, 25(4):525 – 530.〔Abdurahman M, Kurban A, Ablat A, et al. Study on phenological characters of *Populus euphratica* Oliv in the lower reaches of the Tarim River〔J〕. Arid Zone Research, 2008, 25(4):525 – 530.〕

〔25〕 申元村, 汪久文, 伍光和, 等. 中国绿洲〔M〕. 开封:河南大学出版社, 2001.〔Shen Yuancun, Wang Jiuwen, Wu Guanghe, et al. Oasis of China〔M〕. Kaifeng: Henan University Press, 2001.〕

〔26〕 关学锋, 孙卫国, 李敏姣, 等. 1965—2012 年新疆北部地区气候变化及其对北极涛动的响应〔J〕. 干旱区研究, 2016, 33(4):681 – 689.〔Guan Xuefeng, Sun Weiguo, Li Minjiao, et al. Climate change in North Xinjiang and its response to Arctic Oscillation during the period of 1965 – 2012〔J〕. Arid Zone Research, 2016, 33(4):681 – 689.〕

〔27〕 徐浩杰, 杨太保. 1981—2010 年柴达木盆地气候要素变化特征及湖泊和植被响应〔J〕. 地理科学进展, 2013, 32(6):868 – 879.〔Xu Haojie, Yang Taibao. Climate factors change and its impact on lake area and vegetation growth in the Qaidam Basin during 1981 – 2010〔J〕. Progress in Geography, 2013, 32(6):868 – 879.〕

〔28〕 李景林, 张山清, 普宗朝, 等. 近 50 a 新疆气温精细化时空变化分析〔J〕. 干旱区地理, 2013, 36(2):228 – 237.〔Li Jinglin, Zhang Shanqing, Pu Zongchao, et al. Spatial-temporal variation of seasonal and annual air temperature in Xinjiang during 1961 – 2010〔J〕. Arid Land Geography, 2013, 36(2):228 – 237.〕

Spatiotemporal Response of Leaf-Yellow Period of *Populus euphratica* to Climate Change and Its Regional Difference

CHEN Juan, LIU Pu-xing

(*College of Geography and Environment Science*, *Northwest Normal University*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*)

Abstract: In this paper, the average daily temperature data from 41 meteorological stations in Chinese oases where the *Populus euphratica* trees grow during the period from 1960 to 2016 were used to analyze the spatiotemporal response of the leaf-yellow period of *P. euphratica* to climate change and its regional difference. In the study the methods of multi-year trend line, inverse distance weighted interpolation (IDW), Morlet wavelet power spectrum, Mann-Kendall mutation test and correlation analysis were applied. The results revealed that the beginning and ending dates of the leaf yellow of *P. euphratica* were postponed over the last 57 years, and the leaf-yellow period was gradually prolonged. The change trend rates were 0.72, 1.39 ($\alpha \geqslant 0.05$) and 0.66 days/decade respectively, which revealed that the beginning and ending dates of the leaf yellow of *P. euphratica* became earlier along a southwest-northeast transect of Chinese oases. Especially the postponement trend was the most obvious in the Qaidam Oasis but not in the oases in south Xinjiang. In addition to north Xinjiang, the leaf-yellow period became shorter along a south-north transect of Chinese oases, and the spatial disparity was extremely significant. There were the 2.2 –, 3.0 – and 5.2 – 5.6 – year short cycles of the beginning and ending dates of leaf yellow of *P. euphratica*, and they were consistent with the 2 – 4 – year general atmospheric circulation and the 2 – 7 – year El Niño events. Mutations of the starting and ending dates and periods of leaf yellow of *P. euphratica* occurred in 2003, 1990 and 1961 respectively, but they were different from different oases. There were the significant correlations among the starting and ending dates and period of leaf yellow of *P. euphratica* and the mean monthly temperatures in the periods from June to August, from July to September and from September to November, and their correlation coefficients were 0.703, 0.697, and 0.715 ($\alpha \geqslant 0.001$), respectively. The results showed that the response of the leaf-yellow period of *P. euphratica* to global warming was sensitive and regionally different.

Key words: *Populus euphratica*; leaf-yellow period; spatiotemporal response; regionally different; Chinese oasis